

# LP00 – Titre

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

**Niveau :**

**Commentaires du jury**

**Bibliographie**

✦ *Le nom du livre, l'auteur*<sup>1</sup>

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

**Prérequis**

➤ prérequis

**Expériences**

✦ Biréfringence du quartz

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Description du ferromagnétisme</b>	<b>3</b>
1.1	Aimantation et équations de Maxwell . . . . .	3
1.2	Relation constitutive . . . . .	4
1.3	Canalisation/amplification des lignes de champ . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Aimantation d'un matériau ferromagnétique</b>	<b>5</b>
2.1	Phénomène d'hystérésis . . . . .	5
2.2	Aspects énergétiques . . . . .	7
2.3	Interprétation mésoscopique . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Applications du ferromagnétisme</b>	<b>9</b>
3.1	Transformateur parfait . . . . .	9
3.2	Stockage de données : disques durs . . . . .	11
3.3	Paléomagnétisme . . . . .	11

## Jury

L'introduction des milieux linéaires en début de leçon n'est pas judicieuse. Un bilan de puissance soigné est attendu. Le principe de fonctionnement du circuit électrique utilisé pour présenter un cycle d'hystérésis doit être connu. Il faut consacrer du temps aux applications (stockage des données, transformateurs, électroaimants, en justifiant l'adéquation du type de matériau ferromagnétique à la fonction visée. Il est souhaitable de distinguer plus nettement les domaines d'application des ferro doux et des ferro durs (par exemple pourquoi une tête de lecture est-elle en ferro doux alors que le support d'enregistrement est en ferro dur ?).

## Préparation

Biblio : Sanz PSI (prépa, sérieux), Précis Bréal PSI Electrotechnique (le base, clair), BFR 4 (ordres de grandeur et description), Garing EM, Ray : La physique par les objets du quotidien (disque dur).

Plan :

Manip :

Passage :

Questions : aspects micro du magnétisme (LP 45, ma fiche), pseudo intégrateur et ao, rôle et choix des composants du montage (application de Millman, cf le lien infra), magnéto-résistance (calcul géométrique d'un métal normal du cours d'EM, culture wiki)

## Introduction

**Ferromagnétisme** On désigne par ferromagnétisme la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur,  $10^6$  fois plus important que pour des matériaux paramagnétique et de souvent garder une aimantation importante même en champ nul : ils sont devenus "aimants".

### Aimantation permanente

Vidéo : <https://youtu.be/9H8gfyBsZzI?t=40> On met en évidence une l'aimantation permanente d'un aimant permanent en le posant sur une plaquette de boussoles. Les petites aiguilles, elle-même magnétisées, s'orientent dans le sens des lignes de champs de l'aimant permanent. *Les plaquettes de boussoles sont faites pour être placées sur un rétroprojecteur, ce qui rend les lignes de champs beaucoup plus visibles pour l'auditoire.*

**Bonus : boussole** L'élément de base d'une boussole est une tige magnétique. On peut la réaliser en alignant une tige de fer ou d'acier sur le champ magnétique de la Terre et puis en la faisant chauffer puis refroidir (recuire) ou en la frottant. Cependant, cette méthode produit seulement un aimant de faible puissance ; aussi d'autres méthodes sont préférables. Cette tige magnétisée (ou aiguille magnétique) est alors placée sur un support de friction quasi nulle qui lui permet de pivoter librement pour s'aligner sur le champ magnétique ambiant. On y appose alors une marque à une extrémité afin que l'utilisateur puisse distinguer les directions nord et sud. Une convention moderne veut que l'extrémité pointant vers le nord soit marquée d'une manière quelconque, souvent de peinture luminescente ou rouge.

**Application des corps ferromagnétiques en électrotechnique** Transformateur, moteurs.

**Objectif** Décrire, étudier, donner des applications.

## 1 Description du ferromagnétisme

### 1.1 Aimantation et équations de Maxwell

Cette sous-partie a pour but de donner des rappels et poser des notations.

**Aimantation** Un milieu magnétique peut posséder un moment magnétique  $\vec{m}$ . A l'échelle mésoscopique, on définit le vecteur aimantation  $\vec{M}$  en un point P du matériel aimanté comme

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} \quad (1)$$

**Courants libres et courants liés** On distingue les courants issus de déplacements macroscopiques de charges et les courants résultats de boucles de courants locales non uniformes **On montre le schéma du BFR 4 p106.**

$$\vec{j} = \vec{j}_{libre} + \vec{j}_{lié}$$

. On peut montrer que

$$\vec{j}_{lié} = \text{rot}\vec{M}$$

. Avec le schéma du BFR, on montre qu'une variation de  $\vec{M}$  peut induire des courants résultants non nuls.

**Bonus : ARQS** Dans cette leçon, on va se placer dans le cadre du régime de l'ARQS magnétique : les temps de propagation  $\tau$  sont négligés devant les temps caractéristiques de variations des champs  $T = 1/f$ . Pour des systèmes de taille  $L \sim 1\text{m}$ , on considère donc des fréquences  $f \ll 1/\tau = c/L \sim 100\text{MHz}$ . *Plus précisément, les temps de propagation sont négligés devant les temps caractéristiques de variations des champs, les courants  $j$  sont prépondérants devant  $\rho$  et il n'y a pas d'accumulation de charges.*

**Excitation magnétique, équations de Maxwell dans la matière, intérêt de  $\vec{H}$**  On définit l'excitation magnétique  $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 - \vec{M}$ . L'intérêt de  $\vec{H}$  réside dans le fait qu'il est imposable par un générateur de courant ou mesurable avec un ampèremètre par l'expérimentateur. En effet,  $\vec{H}$  n'est lié qu'à  $\vec{j}_{libre}$  à travers le théorème d'Ampère en ARQS :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j}_{libre}$$

et  $\vec{j}_{libre}$  est imposable par l'expérimentateur ou mesurable avec un ampèremètre. (*en électrotechnique, les fréquences utilisées sont bien en dessous du MHz et permettent de se placer en ARQS et négliger le courant de déplacement*). Ainsi, il n'y a pas besoin de connaître la réponse, parfois compliquée, du milieu pour connaître  $\vec{H}$ .

## 1.2 Relation constitutive

**Décompte d'équations, relation constitutive** Il manque une équation pour fermer le problème, il faut se donner une relation constitutive liant  $\vec{M}$  et  $\vec{H}$ .

**Relation linéaire** On a vu que pour un milieu homogène isotrope diamagnétique ou paramagnétique, on peut écrire avec une bonne approximation une relation constitutive linéaire  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  avec  $\chi_m$  la susceptibilité magnétique. **ODG: on donne un tableau.**

**Cas du ferromagnétisme** Pour un matériau ferromagnétique, la relation n'est plus linéaire et n'est plus mono-valuée : elle dépend de l'histoire du système. De plus, la susceptibilité magnétique est beaucoup plus grande que dans les milieux linéaires. Le ferromagnétisme n'existe que dans des corps à structure cristalline. Exemples : Fe, Ni, Co. **ODG:** Au delà d'une certaine température, le matériau n'est plus ferromagnétique mais paramagnétique, cette transition a lieu à la température de Curie **ODG:**  $T_c$  (Fe) = 1043K ;  $T_c$  (Ni) = 631K ;  $T_c$  (Co) = 1400K.

**Un aimant attire un corps ferromagnétique** On considère un matériau ferromagnétique de volume  $V_0$  et susceptibilité  $\chi_m \ll 1$  :

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} = \frac{\chi_m}{1 + \chi_m} \frac{\vec{B}}{\mu_0} \simeq \chi_m \frac{\vec{B}_{ext}}{\mu_0} \quad (2)$$

où on a utilisé  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H}$  et l'approximation  $\chi_m \ll 1$ . Ainsi la force s'exprime

$$\vec{F} = \iiint_{V_0} (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \simeq \iiint_{V_0} \chi_m \vec{\nabla} \frac{B_{ext}^2}{2\mu_0} d\tau \quad (3)$$

Ainsi, macroscopiquement, un matériau ferromagnétique est attiré par les champs forts donc les aimants.

## 1.3 Canalisation/amplification des lignes de champ

On pourrait faire cette partie après le II.

**Canalisation des lignes de champs** Un matériau à grande perméabilité magnétique a tendance à canaliser les lignes de champ magnétique, c'est-à-dire, à les rendre parallèles à sa surface. **On montre le schéma wikipedia.** On va l'expliquer.

**Perméabilité relative et relations de passage** Cette notion peut être précisée à l'aide des relations de passage. L'équation de Maxwell-Thomson donne  $B_n$  (composante normale) continue à l'interface. En l'absence de courants de surface libres,  $H_t$  (composante tangentielle) est continue. On définit la perméabilité relative, analogue magnétique de la permittivité relative comme  $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$  et donc  $\mu_r = 1 + \chi_m$ . Entre un milieu 1 de perméabilité relative 1 comme l'air, et un milieu 2 de perméabilité relative  $\mu_r \gg 1$  on a donc :

$$\begin{cases} \vec{B}_{2n} = \vec{B}_{1n} \\ \frac{\vec{B}_{2t}}{\mu_r} = \vec{B}_{1t} \end{cases} \quad (4)$$

Ainsi  $|\vec{B}_{2t}| \gg \vec{B}_{1t}$ , le matériau ferromagnétique canalise le flux.

**Analogie électrique** Tremollet II p137

Relation	Circuit électrique	Circuit magnétique
Relation constitutive	$\vec{j} = \gamma \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \vec{H}$
Conservation du flux	$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Intégrale de flux	$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$	$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
Circulation (potentiel)	$U = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$	$C = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$
Loi macroscopique	$U = RI$	$C = R\phi$
Résistance & réductance	$R = \int_l \frac{dl}{\gamma S}$	$R = \int_l \frac{dl}{\mu S}$

Ainsi les lignes de champ magnétique suivent le chemin de moindre réluctance. Comme  $\mu_{ferro} \gg \mu_{air}$ , on a  $R_{m,ferro} \ll R_{m,air}$ , un matériau ferromagnétique canalise les lignes de champ magnétique. *En pratique, les lignes de flux ne sont pas simples comme pour les courants dans un circuit électrique, les surfaces équipotentielles sont compliquées. On procède par simulation informatique par itération.* De plus  $C = \int \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j}_{libre} \cdot d\vec{S} = I_{enlace}$ . On retrouve le théorème d'Ampère pour  $\vec{H}$ .

**Bonus : argument énergétique** La densité volumique d'énergie magnétique est en  $B^2/2\mu_0\mu_r$  ainsi il est plus avantageux énergétiquement d'avoir des champs intenses dans un matériau ferromagnétique, plutôt que dans l'air.

**Amplification du champ** En plaçant un matériau ferromagnétique dans une bobine, le champ magnétique à l'intérieur du ferro est  $\sim 1000$  fois plus important que dans l'air s'il n'était pas là.

**Applications : électroaimants**  $\nabla$  Sanz PSI. Un électroaimant est un circuit magnétique, alimenté par un bobine enroulée autour du ferromagnétique. Le circuit magnétique est interrompu par une ou plusieurs zones nommées 'entrefer'. Le matériau ferromagnétique permet de canaliser le champ créé par les bobines vers un entrefer localisé. Les électroaimants sont utilisés pour créer un champ magnétique bien déterminé dans l'entrefer ou pour lever ou attirer des masses ferromagnétiques (s'il y a deux entrefers). Si les effets de bord sont négligeables, c'est-à-dire si l'épaisseur  $e$  de l'entrefer est faible par rapport à la largeur caractéristique du circuit magnétique, par exemple  $\sqrt{S}$ , alors les lignes de champs restent parallèles dans l'entrefer.

**Résolution rigoureuse** On applique ensuite les lois de l'électromagnétisme. L'équation de Maxwell-Thomson,  $\text{div } \vec{B} = 0$ , signifie que le champ magnétique est à flux conservatif. Le flux magnétique à travers une section droite dans le ferromagnétique,  $SB_f$ , est donc identique à celui à travers une section de l'entrefer,  $SB_e$ . On en déduit  $B_e = B_f$ . L'équation de Maxwell-Ampère mène au théorème d'Ampère. Le contour  $C$  est une ligne de champ de longueur  $\ell + e$  ( $\ell$  dans le ferromagnétique,  $e$  dans l'entrefer). Les courants libres sont le courant d'alimentation d'intensité  $i$ . Alors : 1

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_{libre,S} \Rightarrow \ell H_f + e H_e = Ni$$

L'entrefer est constitué d'air amagnétique, donc  $\vec{B}_e = \mu_0 \vec{H}_e$ . Avec cette équation et l'égalité, des champs magnétiques dans le ferromagnétique et l'entrefer :

$$\ell H_f + e H_e = Ni \Rightarrow \ell H_f + e \frac{B_e}{\mu_0} = Ni \Rightarrow \ell H_f + \frac{e}{\mu_0} B_f = Ni$$

Le problème est résolu dès que l'on connaît la relation qui unie  $B_f$  à  $H_f$ .

Pour un milieu doux non saturé linéaire, le cycle d'hystérésis est tellement étroit qu'il est réduit à sa courbe de première aimantation. Tant que le matériau n'est pas saturé, on a la relation  $B_f = \mu H_f$ . Il existe alors une solution analytique unique :

$$\begin{cases} \ell H_f + \frac{e}{\mu_0} B_f = Ni \\ B_f = \mu H_f \end{cases} \Rightarrow B_f = \frac{Ni}{\frac{\ell}{\mu} + \frac{e}{\mu_0}} = \frac{\mu_0 Ni}{\frac{\ell}{\mu_r} + e}$$

Attendu que  $\mu_r \approx 10^5 \gg 1$ , la solution se simplifie en :

$$B_f = \frac{\mu_0 Ni}{e} = B_e$$

**Application : transformateur** Dans un transformateur, le matériau ferromagnétique permet de transférer le flux du circuit primaire au secondaire.

## 2 Aimantation d'un matériau ferromagnétique

### 2.1 Phénomène d'hystérésis

*du grec hysteros, être en retard*

**Objectif** On va identifier expérimentalement le cycle d'hystérésis correspondant à la relation entre  $\vec{M}$  et  $\vec{H}$ . Pour cela, à l'aide courants, on crée une excitation  $H$  connue avec le théorème d'Ampère et on mesure le champ  $B$  créé dans la matière avec la loi de Faraday.

**Hypothèses** Le matériau considéré est homogène et isotrope.

### Tracé expérimental du cycle d'hystérésis

♣ Précis Bréal.

**Montage expérimental** On étudie un tore de ferrite entouré de deux bobinages suivant le montage expérimental projeté. Ce montage permet l'étude du matériau ferromagnétique constituant le tore, qui joue ici le rôle d'un transformateur. Le primaire est alimenté par un GBF, suivi d'un amplificateur de puissance (non dessiné), nécessaire pour atteindre des intensités suffisantes permettant d'observer le cycle d'hystérésis du matériau. Il comporte également un rhéostat de résistance  $r = 33\Omega$ . Le secondaire est constitué d'un pseudo-intégrateur RC. On relève les tensions  $v$  et  $u_s$  à l'oscilloscope.

**Mesure du champ magnétique** Le primaire est alimenté par une tension alternative. Donc la bobine du primaire crée un champ magnétique  $B$  qui dépend du temps. Il y a donc un phénomène d'induction. La loi de Faraday donne

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt}$$

en considérant  $B$  constant sur une section. ⚡ Cette version de la loi de Faraday suppose que  $e_2$  est orienté en convention générateur. De plus, par conservation du flux, au secondaire

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} = \frac{N_2}{N_1} e_1$$

⚡ Idem,  $e_2$  est orienté en convention générateur. Pour remonter à  $B(t)$ , on utilise un pseudo-intégrateur, en choisissant les composants  $R = 100k\Omega$  et  $C = 20\mu F$  pour que la fréquence de travail soit au delà de la fréquence de coupure du passe-bas :  $f_c = 1/(2\pi R_p C) \ll f_{travail} \sim 50\text{Hz}$  avec ici  $f_c \sim 8 \cdot 10^{-2}\text{Hz}$ . ⚡ Il faut savoir retrouver la fonction de transfert et l'utilité de mettre une résistance en parallèle, pour éviter la saturation et améliorer la stabilisation. cf bons rappels

$$u_s(t) = -\frac{1}{RC} \int e_2(t) dt = -\frac{1}{RC} \int \left( -N_2 S \frac{dB}{dt}(t) \right) dt = \frac{N_2 S}{RC} B(t) + \text{cte}$$

Pour remonter à  $B$ , il est nécessaire d'annuler cette constante qui provient de la dérive de l'intégrateur. La mise à zéro est effectuée en déchargeant le condensateur, grâce à une résistance placée en parallèle. Finalement,  $u_s(t)$  est une image du champ magnétique total créé dans le matériau magnétique, à un facteur multiplicatif près.

**Mesure de l'excitation magnétique** Pour déterminer à chaque instant l'excitation magnétique  $H$ , créée par le bobinage de  $N_1$  spires au primaire, appliquons le théorème d'Ampère à un contour de rayon  $r_c$  situé dans le tore magnétique le courant de déplacement est négligés aux fréquences électrotechniques :

$$2\pi r_c H(t) = N_1 i_1(t) + \underbrace{N_2 i_2}_{\text{Négligeable}} \quad (6)$$

où on a choisit  $R$  assez grand :  $r \sim 30\Omega \ll R \sim 3k\Omega$  de manière à négliger  $N_2 i_2$  devant  $N_1 i_1$ . On pourrait aussi invoquer le courant faible dans l'AO, et qu'on approxime le pseudo-intégrateur comme ayant une impédance d'entrée infinie. On obtient alors :

$$H(t) = \frac{N_1 v(t)}{2\pi r_e r} \quad (7)$$

Ainsi  $v$  est proportionnel à l'induction magnétique  $H(t)$ .

**Bonus : rhéostat, stabilisation de l'AO, ferrite** Le rhéostat permet non seulement d'assurer une conversion courant-tension, mais surtout de présenter une charge suffisante au générateur de puissance, sans quoi il ne pourrait pas débiter à cause de son système de sécurité. Il s'agit ainsi de protéger le bobinage du tore, qui a une petite résistance. Le boîtier intégrateur (à préférer à un intégrateur monté à la main) est stabilisé par une résistance montée en parallèle du condensateur et un réglage minutieux de l'offset de l'AO pour limiter la dérive, ce qui est efficace à l'échelle de quelques minutes. Il est muni d'un bouton pour décharger le condensateur si besoin. Les courants de Foucault peuvent altérer notablement l'allure du cycle d'hystérésis si le matériau magnétique est conducteur. On peut même parfois voir apparaître des boucles aux extrémités du cycle. Les pertes augmentent proportionnellement

au carré de la fréquence de parcours du cycle, ce qui impose de travailler à très basse fréquence. Pour contrecarrer ces effets, il faut choisir un tore ferrimagnétique (p.ex. de ferrite), fait d'un matériau isolant, ce qui permet de travailler à 50Hz

**Première aimantation et saturation** On part d'un matériau ferromagnétique à aimantation nulle. Lorsqu'on le soumet à une excitation magnétique, une aimantation apparaît puis sature : on définit l'aimantation de saturation  $M_{sat}$ . En effet, chaque atome du matériau a un moment magnétique fini donc le moment magnétique du matériau est borné par la somme des moments magnétique de ses atomes constitutifs. *L'aimantation rémanente décroît avec  $T$  et devient nulle pour  $T > T_{Curie}$ , mais pas l'aimantation à saturation, puisqu'il s'agit de l'aimantation du matériau  $M_{sat}$  lorsque tous les moments magnétiques sont alignés. De plus  $M_{sat}$  dépend du matériau, en particulier de sa pureté.* Cependant, le champ magnétique ne sature pas continue de croître avec  $H$ .

Métal	$M_{sat}$ ( $\text{Am}^{-1}$ )	$\mu_0 M_{sat}$ (T)
Fer	$1,70 \times 10^6$	2,14
Cobalt	$1,40 \times 10^6$	1,76
Nickel	$0,48 \times 10^6$	0,60

(8)

**Hystérésis et aimantation rémanente** Si l'on abaisse  $\vec{H}$ , on constate que le champ  $\vec{B}$ , et donc  $M$ , ne reprennent pas pour un même champ  $\vec{H}$  les valeurs obtenues précédemment avec  $\vec{H}$  croissant : on observe un phénomène d'hystérésis, le comportement du système dépend de son histoire. A excitation  $\vec{H}$  nulle, une aimantation rémanente persiste : ce sont les aimants permanents.

**Excitation coercitive** Pour annuler l'aimantation, il faut appliquer une excitation  $\vec{H}$  non nulle. *De manière générale, le champ coercitif diminue avec la température.* A  $20^\circ\text{C}$  :

Matériau	$B_r(T)$	$H_c$ ( $\text{A.m}^{-1}$ )
Acier	1.0	$4 \cdot 10^3$
Fe, 3% Si	1.5	8

(9)

**Cycle d'hystérésis et désaimantation** En imposant un champ alternatif, on observe le parcours d'un cycle d'hystérésis. On peut revenir à l'état d'aimantation nulle en faisant parcourir des cycles de plus en plus petits.

**Matériaux durs et doux** Deux cas limites se dégagent :

- Ferromagnétiques doux à faible champ coercitif, inférieur à  $H_c \leq 10^2 \text{A/m}$ . L'aimantation est alors facilement modifiable. Le cycle d'hystérésis est étroit. Les corps doux sont utilisés dans les machines où l'on veut que l'aimantation suive bien la commande : électroaimants, fond des casseroles à induction et où les pertes par hystérésis sont petits : transformateurs. Exemple : fer au silicium (2 % de Si), dont la résistivité diminue aussi les courants de Foucault.
- Ferromagnétiques durs à fort champ coercitif,  $H_c \geq 10^3 \text{A/m}$ . Le cycle d'hystérésis est large. Ils permettent de réaliser des aimants permanents. Exemple : Alnico 5 (51,5 % Fe, 13,5 % Ni, 24 % Co, 8 % Al, 3 % Cu).

## 2.2 Aspects énergétiques

➤ Brenders Bréal, BFR 4 p183 ordres de grandeur des pertes

**Energie magnétique, perte par cycle** On considère le système, {tore + bobinage}. En convention récepteur, la puissance reçue est :  $P = -e_p i_p(t)$  avec  $e_p(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -N_1 A \frac{dB}{dt}$  et  $i_p(t) = \frac{2\pi r_c H(t)}{N_1}$  (théorème d'Ampère). Donc

$$P = \underbrace{2\pi r_c A}_{\text{volumedutore}} H(t) \frac{dB}{dt}$$

La puissance moyenne sur une période de l'excitation est donc :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V H(t) \frac{dB}{dt} dt = \frac{V}{T} \oint_{\text{cycle}} H(t) dB$$

Ainsi, l'aire du cycle d'hystérésis  $B(H)$  ou  $M(H)$  correspond à l'énergie volumique dissipée par le matériau ferromagnétique pendant la période à laquelle le cycle est parcouru. **ODG:** Pour les transformateurs, on utilise industriellement des tôles en fer au silicium (Fe, 3% Si) pour lesquels les pertes sont  $\sim 100 \text{ J/m}^3$  et par cycle pour un champ maximal  $B_m \sim 1T$ .

**Loi d'échelle** La puissance dissipée est en  $B^2 f$ .

**Comparaison des ferromagnétiques doux et durs** Compte-tenu des allures des cycles d'hystérésis, les matériaux doux présentent moins de pertes par hystérésis que les matériaux durs. On les privilégie pour les utilisations qui font parcourir des cycles.

### 2.3 Interprétation mésoscopique

**Compromis énergétique** Microscopiquement, le ferromagnétisme est dû à l'interaction d'échange qui tend à aligner les spins. S'il n'y avait que celle là mise en jeu, le matériau ferromagnétique aurait tendance à avoir tous ses spins alignés. Or l'énergie d'interaction magnétostatique dipolaire, négligeable pour deux spins voisins, ne le devient plus à l'échelle mésoscopique où de nombreux spins sont mis en jeu. Elle tend à opposer les spins. *La structure cristalline introduit aussi une interaction d'anisotropie qui tend à aligner les spins selon des axes liés à la structure cristalline. C'est donc un compromis entre trois interactions. Les propriétés magnétoélastiques peuvent aussi faire apparaître des propriétés mécaniques du réseau, notamment pour les domaines de fermeture.*

**Résultat du compromis : domaines de Weiss** On constate qu'à l'échelle mésoscopique, il existe des domaines où les spins sont alignés : on parle de domaines de Weiss. *Les directions d'aimantation spontanées correspondent à des orientations préférentielles, qui dépendent de la structure du cristal. Par exemple pour le fer, qui cristallise dans le système cubique centré, ces directions sont celles des arêtes du cube. Pour le nickel, qui cristallise dans le système cubique faces centrées, ce sont les diagonales du cube.* Lorsque l'échantillon n'est pas aimanté, les différents domaines ont des orientations très diverses, ce qui résulte en une aimantation macroscopique nulle. **On montre une photo ODG :** taille d'un domaine 10 à 100  $\mu\text{m}$ , l'épaisseur d'une frontière est  $\sim 0.1\mu\text{m}$  (quelques centaines de distances interatomiques). *Si le spin change dans le plan de la paroi, c'est un paroi de Bloch. Si le spin change hors du plan de la paroi, c'est une paroi de Néel, qui est moins énergétique à faible épaisseur de matériau.* 

#### Visualisation des domaines de Weiss

Placer une lame de ferrite dans le microscope polarisant (celle avec le sourire marche bien) et filmer. Approcher et éloigner un aimant permanent et commenter les domaines de Weiss, qui apparaissent par polarisation par effet Faraday.

**Bonus : effets magnéto-optiques** L'ensemble des phénomènes résultant de l'interaction d'une onde électromagnétique avec la matière en présence d'un champ magnétique constitue la magnéto-optique. La modification de la polarisation de l'onde initiale dépend de l'orientation du champ magnétique par rapport au vecteur de propagation de la lumière, de la polarisation de la lumière ainsi que de la méthode de mesure employée, à savoir, par transmission ou par réflexion.

**Bonus : microscopie à effet Kerr** L'effet Kerr magnéto-optique désigne le changement de polarisation d'une onde électromagnétique qui est réfléchi sur un matériau aimanté  $M$ . Lorsque l'onde est transmise par le matériau, on l'appelle effet Faraday. La polarisation du rayon incident est modifiée par le champ magnétique généré par l'échantillon, auquel on peut associer un indice différent pour les polarisations circulaire gauche et circulaire droite. Celui-ci a donc des propriétés optiques de biréfringence circulaire. Une polarisation rectiligne voit sa direction de polarisation changée à la réflexion et devient éventuellement elliptique, selon la direction de l'aimantation par rapport au vecteur de propagation de l'onde. Ce changement de polarisation est traduit par une variation de l'intensité du faisceau par un analyseur. Le faisceau est ensuite capté et transformé en image via un traitement d'image.  **Il ne faut pas confondre avec l'effet Kerr électro-optique où la biréfringence est linéaire (pas circulaire), avec  $\Delta n \propto E^2$ .**

**Interprétation des domaines de Weiss comme une compétition surface/volume** L'interaction d'échange a une énergie proportionnelle à la surface du domaine de Weiss, et l'interaction magnétostatique a une énergie inversement proportionnelle au volume du domaine : l'énergie devant être minimisée, on a une compétition surfacique-volumique qui tend à créer de petits domaines lorsque l'excitation extérieure est nulle, et de grands domaines lorsqu'elle est non nulle. [Une explication visuelle est sur fiche.](#)

#### Organisation en domaines

Pour achever de convaincre de l'importance des interactions dipolaires, on montre la vidéo <https://youtu.be/QgwReDkppq6E?t=83> on voit cette manifestation à l'échelle macroscopique : ici, il n'y a pas d'interaction d'échange, uniquement une interaction dipolaire. Une aiguille simule un domaine microscopique où les moments magnétiques

sont alignés par interaction d'échange. L'interaction dipolaire a tendance à organiser les dipôles en domaines.

**Effet d'un champ magnétique externe, irréversibilité** Lorsqu'un champ magnétique est appliqué au matériau, certains domaines sont énergétiquement favorisés face aux autres dont le volume diminue. Il y a alors déplacement des parois. Pour des champs faibles le déplacement est réversible *les domaines sont gros par rapport à la distance inter-défauts*. Mais, lorsque le champ devient fort et que les parois rencontrent des « obstacles », comme des impuretés et des défauts cristallins, leur déplacement devient irréversible, au sens thermodynamique du terme. Pour un champ encore plus élevé, les domaines deviennent moins nombreux et les directions des aimantations ne sont plus celles de l'aimantation spontanée. Il y a rotation de l'aimantation, disparition de parois et l'on arrive à la saturation.

**Interprétation de la désaimantation** Nous avons donc une explication de la courbe de première aimantation, mais aussi de la courbe de désaimantation où l'aimantation rémanente existe à cause des déplacements irréversibles des parois. Pour forcer les parois à s'agencer de manière à annuler  $M$ , il faut alors appliquer un champ opposé, d'où le champ coercitif.

**Interprétation des pertes par hystérésis** Concrètement, les pertes par hystérésis traduisent l'énergie transmise au matériau lors du déplacement des parois sur les défauts. *In a large crystal, changes in magnetization occur by changing the size of domains. In polycrystalline samples with very small crystallites, changes in magnetization occur by flipping over individual single-domain crystallites. Both of these processes can require an activation energy (domain motion requires activation energy if domain walls are pinned) and thus result in hysteretic behavior of magnetization in ferromagnets.*

**Bonus : Visualisation des domaines** La mise en évidence expérimentale la plus directe des domaines est celle des *poudres magnétiques*, due à Francis Bitter en 1931. Elle consiste à disposer, à la surface polie du matériau ferromagnétique, une suspension colloïdale de particules magnétiques (par exemple  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) : ces particules s'aimantent et sont alors soumises à des forces qui les attirent vers les zones de champ intense. Ces zones sont les frontières entre les domaines de Weiss, et les particules s'y rassemblent en les dessinant. Visibles au microscope, elles indiquent que les dimensions typiques des domaines sont  $\sim 10 - 100\mu\text{m}$ . On peut aussi les observer par effet magnéto-optique (Kerr, Faraday), avec de la diffraction de neutrons (diffusion nucléaire forte et interaction avec les moments), électrons (force de Lorentz) ou rayons X (on voit la magnétostriction).

**Bonus : domaines de fermeture** A la surface d'un ferromagnétique, on observe des "domaines de fermeture" qui diminuent ou même annulent le champ créé à l'extérieur. Ces domaines de fermeture ont des formes qui dépendent des directions de facile aimantation du cristal et "stockent" de l'énergie magnétoélastique par magnétostriction.

**Bonus : effet Barkhausen (1919)** L'aimantation augmente de manière discontinue. Les variations discontinues d'aimantation ne sont pas dues au retournement d'un domaine entier mais au déplacement irréversible de parois "*unpinning*" des défauts. Elles produisent dans une bobine entourant le matériau ferromagnétique des fém induites très brèves que l'on amplifie. En branchant un haut-parleur en sortie, on entend un crépitement.

**Bonus : fabrication d'aimants permanents** Pour obtenir des aimants stables avec un fort champ coercitif, il faut que le matériau soit composé de petits monocristaux ne contenant qu'un seul domaine magnétique, si leurs dimensions sont assez faibles. **ODG:** de 20 à 100 nm.

## 3 Applications du ferromagnétisme

L'idéal est de choisir une application où l'on exploite la grosse susceptibilité (induction, électro-aimant), une autre où l'on exploite la coercivité et rémanence (disque dur, aimants, magnétométrie...)

### 3.1 Transformateur parfait

✦ Sanz MPSI PTSI

C'est un peu bof de faire un transformateur parfait avec  $\mu = \infty$  après avoir fait des tracés de cycles. Privilégier l'électroaimant du Sanz.

**Description et application** Un transformateur est un appareil qui modifie l'amplitude de tensions et de courants alternatifs. Ils sont omniprésents au quotidien : pour convertir les hautes tensions des lignes haute tension vers le 220 V secteur puis vers les basses tensions pour les chargeurs de téléphone/ordinateur. **On montre des photos diverses..** Il se compose d'une carcasse ferromagnétique et de deux enroulements. Le matériau ferromagnétique sert à transférer le flux créé par une bobine à l'autre, grâce à sa grande perméabilité magnétique et donc conserver le flux magnétique le

long du circuit magnétique qu'il forme. Les enroulements sont constitués de fils de cuivre, bobinés autour du circuit magnétique.

**Enroulement primaire, secondaire** L'enroulement primaire, ou plus simplement le primaire, ici constitué de  $N_1$  spires, est celui qui reçoit l'énergie électrique, que restitue à la charge l'enroulement secondaire, ou secondaire, constitué de  $N_2$  spires.

**Principe** Le primaire, soumis à la tension alternative  $u_1(t)$ , est parcouru par le courant alternatif d'intensité  $i_1(t)$ . Ce courant  $i_1(t)$  crée un champ magnétique variable  $\vec{B}(t)$ . Le ferromagnétique canalise ce champ jusqu'au secondaire. Le champ variable  $\vec{B}(t)$  crée alors un flux variable dans l'enroulement secondaire. Une f.é.m.  $u_2(t)$  est donc induite au secondaire. **On montre des schémas électriques.**

**Hypothèses** On suppose le transformateur parfait (perméabilité magnétique  $\mu \rightarrow \infty$ ) : il n'y a pas de perte de flux. On suppose que le secondaire fonctionne à vide (pas de perte Joule).

Un transformateur idéal est caractérisé par l'absence de perte de puissance et de fuite de flux.

**Rapport de transformation** Quel est le lien entre  $u_2(t)$ , tension au secondaire, et  $u_1(t)$ , tension au primaire ? Soit  $S$  la section du circuit magnétique. Le flux de  $\vec{B}(t)$  à travers une section droite, c'est-à-dire orthogonale au champ magnétique, est donc  $B(t)S$ . **Faire attention à l'orientation.** Le flux total à travers les  $N_1$  spires du primaire est donc  $\phi_1(t) = N_1 B(t)S$ , celui au secondaire est  $\phi_2(t) = N_2 B(t)S$ . Les f.é.m. induites au primaire et au secondaire sont alors :

$$e_1(t) = -\frac{d\phi_1}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt} \quad e_2(t) = -\frac{d\phi_2}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (10)$$

Avec  $u_1 = -e_1$  et  $u_2 = -e_2$  (fonctionnement à vide), on obtient :

$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} \equiv m \quad (11)$$

où  $m$  est le rapport de transformation. On vérifie la valeur trouvée expérimentalement. **ODG:**  $m \sim 10^{-3}$  pour passer des lignes 20 kV au secteur 220 V.

**Rendement, causes de pertes** Les pertes cuivre sont dues à l'effet Joule dans les bobinages primaire et secondaire. Les pertes fer se répartissent en pertes par hystérésis, dues au parcours du cycle d'hystérésis, réduites en utilisant un milieu doux ; pertes par courant de Foucault, dues à l'effet Joule dans la masse du ferromagnétique, réduite en feuilletant le milieu ou en utilisant un milieu isolant. **ODG:** La minimisation des pertes permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 95% pour des transformateurs de quelques dizaines de kW, et supérieur à 99% pour de très grosses unités. Le modèle du transformateur idéal s'en trouve légitimé.

**Bonus : tracé de cycle d'hystérésis** La géométrie d'un transformateur permet de relever expérimentalement le cycle d'hystérésis d'un ferromagnétique. La tension  $v_2$ , égale à  $N_2 S \frac{dB}{dt}$ , est intégrée, pour mener à  $y(t) = N_2 S B(t) + y_0$ . L'intégrateur utilisé présente une impédance d'entrée infinie, afin d'imposer  $i_2 = 0$ . On l'obtient en ajoutant, par exemple, un suiveur à amplificateur opérationnel en entrée de bloc. Le théorème d'Ampère, appliqué sur une ligne de champ de longueur  $\ell$ , canalisée par le ferromagnétique, mène à  $H\ell = N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_1$ . On en déduit que la tension  $x(t)$  vaut  $\frac{R_1 \ell}{N_1} H(t)$ . Il suffit finalement de tracer  $y$  en fonction de  $x$ , sur un oscilloscope en mode XY. On se sera placé en mode AC pour la tension  $y$ , afin de filtrer la constante  $y_0$ . On visualise alors, à des constantes multiplicatives près, le cycle d'hystérésis,  $B$  en fonction de  $H$ .

**Bonus : Transformateur d'isolement** La tension secondaire est une copie conforme de la tension primaire alternative. Les circuits primaire et secondaires ont aucun lien électrique. Ils peuvent en particulier avoir deux masses différentes, sans risquer de court-circuit.

**Bonus : transfert d'impédance** cf. ma fiche

#### Illustration du transformateur

Matériel : deux bobines de nombre de spires différents, un circuit ferromagnétique doux, deux voltmètre, un GBF. On mesure le rapport de transformation et on vérifie qu'il correspond au rapport des nombres de spire.

**Sources de pertes** En pratique, on a des pertes joules (dues au bobinage de cuivre), des pertes fer (par courants de Foucault et par hystérésis) et des pertes de flux magnétique (canalisation imparfaite). Pour éviter les pertes fer, on utilise donc un matériau feuilleté orthogonalement aux courants, et un ferromagnétique doux.

## 3.2 Stockage de données : disques durs

↗ La physique des objets du quotidien

**Principe** Sur le disque, l'information est stockée sous forme de secteurs d'aimantations différentes. Ainsi, le champ magnétique à la surface du disque varie et sa mesure permet d'en déduire les bits stockés.

**Stockage** Il s'agit de créer des aimants permanents. Pour cela, il faut utiliser un ferromagnétique dur et tirer profit de l'effet de mémoire (aimantation rémanente) lié à l'hystérésis.

**Lecture : tête inductive** Une tête ferromagnétique canalise les lignes de champ issues des secteurs d'aimantation du disque dur. Une bobine est enroulée autour de la tête. Par induction de Faraday, un changement de secteur aimanté induit une variation de flux dans le circuit magnétique qu'est la tête de lecture, ce qui se traduit en une fem induite dans la bobine, qui est mesurée. Pour minimiser l'effet mémoire de la tête de lecture, on utilise un ferromagnétique doux. **ODG:** entre 10 et 100 nm entre la tête et le disque à une vitesse de 130 km/h

**Ecriture : tête inductive** La même tête inductive, lorsqu'elle est parcourue par un courant, génère un champ magnétique qui permet l'écriture.

**Lecture : tête magnétorésistive** Pour la lecture, on peut aussi utiliser l'effet de magnétorésistance. Mais l'écriture est assurée par une tête inductive séparée. La résistance d'un circuit électrique se déplaçant à proximité d'une zone magnétique varie lorsque l'orientation de l'aimantation de la zone change brusquement. Afin d'optimiser le couplage avec le support de stockage, un matériau ferromagnétique est également utilisé. Pour minimiser l'effet mémoire de la tête de lecture, on utilise un ferromagnétique doux.

**Bonus : magnétorésistance** Magnetoresistance is the tendency of a material (often ferromagnetic) to change the value of its electrical resistance in an externally-applied magnetic field. There are a variety of effects that can be called magnetoresistance (cf. cours de Jérém). Some occur in bulk non-magnetic metals and semiconductors, such as geometrical magnetoresistance, Shubnikov de Haas oscillations, or the common positive magnetoresistance in metals. Other effects occur in magnetic metals, such as negative magnetoresistance in ferromagnets or anisotropic magnetoresistance (AMR). Finally, in multicomponent or multilayer systems (e.g. magnetic tunnel junctions), giant magnetoresistance (GMR), tunnel magnetoresistance (TMR), colossal magnetoresistance (CMR), and extraordinary magnetoresistance (EMR) can be observed.

La magnétorésistance correspond à la variation de la résistance électrique en la présence d'un champ magnétique. Des effets très importants ont été observés sur des nanostructures, tout d'abord sur des structures d'empilement alterné de matériau ferromagnétique et de matériau magnétiquement neutre. En l'absence de champ, le couplage magnétique entre couches ferromagnétiques présente un caractère oscillant en fonction de l'épaisseur des couches neutres, et conduit tantôt à l'alignement, tantôt à l'antialignement des moments des diverses couches. Ce caractère oscillant correspond au phénomène, bien connu des physiciens du magnétisme, de polarisation oscillant avec la distance du moment de spin des électrons de conduction (interaction de Rudermann-Kittel- Kasuya-Yoshida ou RKKY), responsable par exemple du couplage indirect à distance des moments des couches 4f pour les métaux de terres rares.

**Bonus : magnétorésistance géante** Giant magnetoresistance (GMR) is a quantum mechanical magnetoresistance effect observed in multilayers composed of alternating ferromagnetic and non-magnetic conductive layers. The 2007 Nobel Prize in Physics was awarded to Albert Fert and Peter Grünberg for the discovery of GMR.

The effect is observed as a significant change in the electrical resistance depending on whether the magnetization of adjacent ferromagnetic layers are in a parallel or an antiparallel alignment. The overall resistance is relatively low for parallel alignment and relatively high for antiparallel alignment. The magnetization direction can be controlled, for example, by applying an external magnetic field. The effect is based on the dependence of electron scattering on the spin orientation.

The main application of GMR is magnetic field sensors, which are used to read data in hard disk drives, biosensors, microelectromechanical systems (MEMS) L'écriture continue à être assurée par une tête inductive.

## 3.3 Paléomagnétisme

↗ Tremolet II p.397

**Les roches ferromagnétiques et l'histoire du champ magnétique terrestre** Le champ magnétique terrestre est majoritairement dipolaire, avec une intensité à la surface de  $1G = 10^{-4}T$ . Il existe des roches ferromagnétiques (la magnétite par exemple) qui, lors de leur formation, s'aimantent selon la direction du champ magnétique ambiant, qui peut être le champ magnétique terrestre. Si on connaît l'âge de ces roches, et si elles n'ont pas changé d'orientation, on peut alors obtenir l'orientation du champ magnétique terrestre en fonction du temps.

**Dorsales** Un des exemples les plus fameux concerne les roches de la croûte océanique. Dans les années soixante, en promenant des sondes magnétiques au bout de câbles, à partir de bateaux, on a pu mesurer l'aimantation de la croûte. On constate qu'elle varie et change de sens en fonction de la profondeur. On en déduit que le champ magnétique terrestre inverse régulièrement sa polarité et que les dorsales océaniques s'étirent. Encore mieux : une fois les inversions cartographiées et datées, on peut en déduire la vitesse d'extension de n'importe quelle dorsale. **ODG:** Inversions tous les 750000 ans en moyenne, avec une statistique de Poisson *pas de mémoire*. L'inversion elle-même prendrait  $\sim 1000$  ans. Les plus vieux planchers océaniques ont 180Ma.

**Bonus : origine du champ magnétique terrestre** Le champ magnétique terrestre n'est pas produit par un matériau ferromagnétique (pas d'aimant permanent géant), mais par des effets dynamo au sein du noyau de fer liquide. Le champ magnétique ( $\mathbf{B}$ ) dépend de la vitesse ( $\mathbf{u}$ ), du temps ( $t$ ), de la perméabilité magnétique ( $\mu$ ) et de la diffusivité magnétique ( $\eta = 1/\sigma\mu$ ) selon l'équation d'induction :

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \eta \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (12)$$

Le rapport entre le second terme du côté droit et le premier terme correspond au nombre de Reynolds magnétique.

**Champ magnétique et vent solaire** Le champ magnétique terrestre dévie le plasma d'ions-électrons *i.e.* le vent solaire que le Soleil envoie vers la Terre en continu. *Une partie se retrouve aux pôles et ionise une partie de l'ionosphère : ce sont les aurores boréales.* Lors d'épisodes plus violents, les éruptions solaires, ces particules de haute énergie sont nocives pour la santé, leur effet étant similaire à une exposition à de la radioactivité et posent d'ailleurs problème pour les voyages spatiaux. Une inversion du champ magnétique implique un moment où il s'annule, et peut donc être potentiellement dangereuse... On peut toutefois se rassurer en constatant qu'il n'y a pas de corrélation entre inversion du champ et extinction massive dans l'échelle des temps géologiques ! Le plus préoccupant en cas d'affaiblissement du champ magnétique terrestre serait une protection moindre contre les effets destructeurs des éruptions solaires sur les appareils électriques, car le plasma solaire crée des courants dans la ionosphère, qui produisent des champs magnétiques fluctuants, qui à leur tour induisent des courants dans les lignes haute-tension par exemple. Un tel événement a entraîné une coupure de courant de plusieurs heures dans tout le Québec en 1989, et aurait des conséquences encore plus désastreuses aujourd'hui.

## Conclusion

Au cours de cette leçon, nous avons donc pu caractériser une nouvelle famille de matériaux : les corps ferromagnétiques. Leur susceptibilité magnétique très forte donne naissance à un cycle d'hystérésis ce qui rend le matériau dépendant de son histoire (applications au paléomagnétisme).

Les ferromagnétiques sont connus depuis longtemps, notamment pour la réalisation d'aimants permanents, mais les applications industrielles sont bien plus récentes : transformateur, moteurs, et maintenant stockage d'information.

Le comportement ferromagnétique est donc à distinguer des comportements diamagnétique et paramagnétique, mais il apparaît comme une version plus forte du paramagnétisme. Nous verrons en effet que la susceptibilité magnétique dépend de la température et qu'au-delà d'une certaine température (température de Curie), les corps ferromagnétiques se comportent comme des paramagnétiques : c'est la transition de phase ferro-para. **Ouverture :** Transition ferro-para. A haute température.

1. Présentation du ferromagnétisme.
  - (a) Relation constitutive,  $\chi_m$  d'un ferromagnétique : non linéaire, possibilité d'aimantation rémanente. température de Curie, ordre de grandeur
  - (b) Canalisation des lignes de champ magnétique dans le ferromagnétique (ou canalisation du flux). Relations de passage, conditions limite.
2. Cycle d'hystérésis
  - (a) Montage : mesure de cycle d'hystérésis.
  - (b) Aspects énergétiques. Ferromagnétisme doux et dur.

(c) Domaines de Weiss.

### 3. Applications

(a) Le transformateur parfait, hypothèses.

(b) Stockage de données

(c) Paléomagnétisme

(d) Autres : moteurs, magnétorésistance, plaques à induction.

Conclusion : relation constitutive non linéaire.

## Conclusion

Ouverture :

## Compléments/Questions

### Questions

- Ferromagnétiques purs dans la nature ? Alliage ? Fe, Ni, Co seuls éléments purs et ferromagnétiques aux conditions normales de pression et de température. Car le ferromagnétisme dépend bien de la température (transition entre ferromagnétique-paramagnétique à la température de Curie). Des lanthanides sont ferromagnétiques autour de 1K. La magnétite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et des oxydes de fer (ferrite). Ils ne sont pas vraiment ferromagnétiques mais ferrimagnétiques.
- Dans le tableau des analogies, domaine de validité des lois  $u = ri$ ,  $C_m = R_m$  ? Dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires (magnétiques), on néglige le courant de déplacement.
- A quoi sert l'amplificateur du primaire ? Atteindre une puissance suffisante pour produire une excitation H assez forte.
- On considère une spire de courant. Forme des lignes de champ avec et sans le ferromagnétique ? Avec le ferro, les lignes de champ à l'intérieur du ferro sont canalisées. Mais à l'extérieur, les lignes de champ sont les mêmes.
- Pourquoi coercitif ? De coercion, on le force à s'orienter dans l'autre sens.
- Dans les calculs de champs/ courants avec le théorème d'ampère, il faut penser à faire les symétries du système :  $\vec{H}$  est orthoradial :  $\vec{H} = H(r)\vec{e}_\theta$ . Pour le transformateur, le ferromagnétisme utilisé n'est pas un tore c'est un carré.
- Dans un transformateur, est-ce qu'il y a d'autres pertes que les pertes fer et les pertes cuivre ? Fuites de flux magnétique et courants de Foucault.
- Pourquoi l'aimantation des roches ne changent pas lors d'une inversion du champ magnétique terrestre ?
- Dépendance du champ coercitif avec la température ? De manière générale, le champ coercitif diminue avec la température (à un taux d'environ 2 0.3%/deg) de même que l'aimantation à saturation (à un taux d'environ 0.03%/deg).
- Dans le calcul de H en fonction de  $i_1$  avec le théorème d'Ampère quand  $N_1 = N_2$ , pourquoi négliger  $i_2$  ? Les tensions sont égales et la résistance dans  $R_1$  est plus grande dans 1 donc le courant est plus grand dans  $i_1$ .
- Comment désaimanter un aimant ? Parcourir des cycles d'hystérésis ou chauffer pour dépasser la température de Curie.
- Ordre de grandeur de champs magnétiques :  $10^{-5}$  en statique 20 T, 80 T en temps courts.
- Représentation d'une paroi de Bloch ? rotation continue du spin : transverse ou longitudinal selon si c'est une paroi de Bloch ou de Néel.
- Explication des domaines de Weiss : compétition entre énergie volumique et énergie surfacique. Comment sont-ils détruits ? L'aimantation tourne pour s'aligner avec le champ du coup les parois ont plus de sens à un moment.
- Tous les domaines ont la même aimantation ? En norme oui. Comment mesurer l'aimantation spontanée ?

- Comment calculer les lignes de champ magnétique ?
- Comment obtenir les relations sur les flux et les circulations ? (cf. réluctance)
- Quelle est l'origine du magnétisme ?
- Quelle échelle pour le magnétisme ? (macroscopique ? mésoscopique ? microscopique ?)
- Comment fonctionnent les domaines de Weiss ?
- À quoi est due la microréversibilité du cycle d'hystérésis et à quelle échelle l'observe-t-on ?
- Quelles sont les recherches aujourd'hui sur le magnétisme ?
- Peut-on observer un magnétisme pour des systèmes monoatomiques ?
- **Ferrofluide : ferro ou para ?** Un ferrofluide est une suspension colloïdale de particules ferromagnétiques constituées d'un seul domaine de Weiss. Cela confère au fluide un comportement de type paramagnétique.
- **Aimantation d'une boussole ?** En pratique, pour aimanter une boussole, on la chauffe au delà de la température de Curie et on la refroidit dans un champ magnétique qui empêche la formation de domaines de Weiss. Bien entendu, ce champ magnétique ne peut pas être créé par un aimant qui perdrait lui aussi son aimantation. On place donc l'aiguille à aimanter dans un solénoïde parcouru par un courant.
- **Est-ce que tu peux revenir sur l'expérience de l'aimant brisé et explicite en quoi cela implique que l'aimantation est une propriété volumique ?**
- **Peux-tu préciser d'où vient l'aimantation dans la matière ? A quoi correspond le terme jlié ?**
- **Peux-tu revenir sur les hypothèses qui te permettent d'écrire les relations de Maxwell ? Il manque des équations dans le décompte car les trois équations du rotationnel ne sont pas indépendantes.**
- **Peux-tu donner des ordres de grandeurs des susceptibilités magnétiques des corps dia- et paramagnétiques ? Quelle est l'origine microscopique de ces comportements ?**
- **Est-ce qu'il faut forcément un réseau cristallin pour permettre le ferromagnétisme ?**
- **Une fois que le matériau est aimanté, comment peut-on le désaimanter ?**
- **Une fois que le matériau est aimanté, comment peut-on le désaimanter ? Comment expliquer le phénomène d'hystérésis ? Est-ce que tu peux tracer le cycle d'hystérésis pour B en fonction de H au lieu de M en fonction de H ? Quelle sont les interactions qui expliquent la formation des domaines de Weiss ? Est-ce qu'il y a d'autres pertes que les pertes fer et les pertes cuivre ? Pourquoi l'aimantation des roches ne changent pas lors d'une inversion du champ magnétique terrestre**
- **ODG de la susceptibilité d'autres comportements magnétiques**
- **Le transformateur proposé est-il vraiment parfait ?**
- **Comment justifier la canalisation des lignes de champ ? Pourquoi un ferromagnétique se comporte ainsi ?**
- **L'interaction qui favorise l'ordre ferromagnétique est-elle de type dipolaire ? Quelle est son origine ? Réexpliquez simplement la transition de phase.** Nope, ce n'est pas une interaction dipolaire mais combinaison Principe de Pauli + répulsion coulombienne.
- **Qu'est ce que sont les parois de Bloch ? Rôle de Mr Bloch en physique du solide ?** De Félix Bloch (physicien suisse) et non Eugène Bloch (physicien français qui a contribué à la radio et à la spectroscopie) Prix Nobel en 1952 : « pour leur développement de nouvelles méthodes de mesures magnétiques nucléaires fines et les découvertes qui en ont découlé », soit principalement la RMN  
Thèse avec Heisenberg (svp!) : physique du solide, fonctions de Bloch (1928)  
Premier directeur général du CERN.
- **Montage : fonction de transfert ? pseudo-intégrateur ? rôle de chaque composant ? pourquoi un ampli de puissance ? Quand vous coupez l'alim, quels processus de relaxation et quels temps caractéristiques mis en jeu ?**
- **Quelles recherches aujourd'hui sur le magnétisme ?**

- **Existe-t-il du magnétisme pour des systèmes monoatomiques ?**
- **Comment fonctionnent les résistances dont la résistance varie lors de la variation d'un champ ?**
- **Citer d'autres phénomènes d'hystérésis.** Matériaux ferroélectriques (Champ E vs Polarisation)  
Matériaux élastiques  
Angle de contact (cf loi de Jurin)  
Solidification/liquéfaction de certains corps (ex : agar-agar)  
Biologie : poumons lors de inspiration/expiration, voix début/fin de parole  
Est-ce que tu peux revenir sur l'expérience de l'aimant brisé et explicité en quoi cela implique que l'aimantation est une propriété volumique ?
- Peux-tu préciser d'où vient l'aimantation dans la matière ?
- A quoi correspond le terme jlié ?
- Peux-tu revenir sur les hypothèses qui te permettent d'écrire les relations de Maxwell ?
- Il manque des équations dans le décompte car les trois équations du rotationnel ne sont pas indépendantes.
- Peux-tu donner des ordres de grandeurs des susceptibilité magnétiques des corps dia- et paramagnétiques ?
- Quelle est l'origine microscopique de ces comportements ?
- Est-ce qu'il faut forcément un réseau cristallin pour permettre le ferromagnétisme ?
- Une fois que le matériau est aimanté, comment peut-on le désaimanter ?
- Comment expliquer le phénomènes d'hystérésis ? Est-ce que tu peux tracer le cycle d'hystérésis pour B en fonction de H au lieu de M en fonction de H ?
- Quelle sont les interactions qui expliquent la formation des domaines de Weiss ?
- Est-ce qu'il y a d'autres pertes que les pertes fer et les pertes cuivre ?
- Pourquoi l'aimantation des roches ne changent pas lors d'une inversion du champ magnétique terrestre ?
- Une question a été posée sur la dépendance du champ coercitif avec la température. De manière générale, le champ coercitif diminue avec la température (à un taux d'environ 0.3%/°C) de même que l'aimantation à saturation (à un taux d'environ 0.03%/°C). Il existe néanmoins des cas pathologiques où le champ coercitif augmente avec la température (j'ai trouvé l'exemple d'un alliage à partir du samarium Sm(CoCuFeZr) mais il faut une concentration précise en cuivre pour observer le phénomène)
- ODG de la susceptibilité d'autres comportements magnétiques.
- Bornes homologues d'un transfo et intérêt ?
- Explication du point de Curie ? Comment le faire comprendre à des élèves de lycée ?
- L'interaction qui favorise l'ordre ferromagnétique est-elle de type dipolaire ? Quelle est son origine ? Réexpliquez simplement la transition de phase.
- Qu'est ce que sont les parois de Bloch ? Rôle de M. Bloch en physique du solide ? Ondes de Bloch.
- Pseudo-intégrateur ? rôle de chaque composant ? pourquoi un ampli de puissance ? Quand vous coupez l'alim, quels processus de relaxation et quels temps caractéristiques mis en jeu ?
- Microréversibilité du cycle due à quoi et observable à quelle échelle ? Quelles recherches aujourd'hui sur le magnétisme ? Existe-t-il du magnétisme pour des systèmes monoatomiques ?
- Pourquoi observe-t-on les domaines de Weiss au microscope polarisé (effet Faraday) ? À quoi sont dues les irrégularités sur la courbe de première aimantation (aux défauts du matériau qui « fixent » les parois de Bloch) ? Pourquoi n'observe-t-on plus l'aimantation à hautes températures, quelles sont les grandeurs en compétition ?
- Pourquoi dans le circuit intégrateur du transfo mettre une résistance en parallèle de la capacité ? Pseudo-intégrateur.
- Comment  $T_{sat}$  est elle reliée à  $M_{sat}$  ? Modèle champ moyen, forme de fourche.

- Comment fonctionnent les résistances dont la résistance varie lors de la variation d'un champ ? Couplage avec la température ? Magnétorésistance ?
- Quel matériau utilise-t-on alors dans les transformateurs ? Comment éviter les courants de Foucault ? Démontrez rapidement que l'aire du cycle correspond à un travail perdu.
- ODG de la susceptibilité d'autres comportements magnétiques.
- Le transformateur proposé est-il vraiment parfait ? Ma grosse erreur fut d'introduire une perméabilité magnétique finie, ce qui allait déjà contre les hypothèses du transfo idéal sans que je le dise dès le début. Comment justifier la canalisation des lignes de champ ? Pourquoi une ferromagnétique se comporte ainsi ? J'ai avancé un argument basé sur l'expression de l'énergie électromagnétique, grandeur à minimiser, ils n'étaient pas assez convaincus.
- Bornes homologues d'un transfo et intérêt ?
- Explication du point de Curie ? Comment le faire comprendre à des élèves de lycée ? - l'interaction qui favorise l'ordre ferromagnétique est-elle de type dipolaire ? Quelle est son origine ? Réexpliquez simplement la transition de phase.
- Qu'est ce que sont les parois de Bloch ? Rôle de Mr Bloch en physique du solide ?
- fonction de transfert ? pseudo-intégrateur ? rôle de chaque composant ? pourquoi un ampli de puissance ?
- Quand vous coupez l'alim, quels processus de relaxation et quels temps caractéristiques mis en jeu ?
- questions sur le magnétisme et son origine quantique (quelle échelle pour le magnétisme ? Comment fonctionnent les domaines de Weiss ? Microréversibilité du cycle due à quoi et observable à quelle échelle ? Quelles recherches aujourd'hui sur le magnétisme ? Existe-t-il du magnétisme pour des systèmes monoatomiques ? etc)
- Provenance de l'hystérésis ? Qu'est-ce que la reluctance ? Comment faire sentir pédagogiquement le lien entre le sens du courant et la direction du champ induit ? D'autres applications de l'aimantation ? (J'avais parlé des aimants et du paléomagnétisme)
- Expliquer qualitativement d'où vient la formule  $\text{div } \mathbf{M} = \text{rot } \mathbf{M}$ .
- Comme j'avais négligé les courants dans le circuit secondaire sur le montage pour tracer le cycle d'hystérésis, il m'a demandé d'expliquer cette approximation (courants faibles dus à l'amplificateur opérationnel).
- Pourquoi observe-t-on les domaines de Weiss au microscope polarisé (effet Faraday) ? À quoi sont dues les irrégularités sur la courbe de première aimantation (aux défauts du matériau qui « fixent » les parois de Bloch) ? Pourquoi n'observe-t-on plus l'aimantation à hautes températures, quelles sont les grandeurs en compétition ?
- Comment obtenir expérimentalement la courbe de première aimantation ? Pourquoi dans le circuit intégrateur du transfo mettre une résistance en parallèle de la capacité ? Comment avez-vous choisi le nombre de spires ? Comment désaimanter un matériau magnétique ? Comment s'interprète la température de Curie paramagnétique ? Quelle est la différence entre les ferrimagnétiques et les ferromagnétiques ayant deux types d'atomes différents ? Ordre de grandeur de l'aimantation rémanente du fer ? L'évaluer sachant qu'on ne peut imposer un champ supérieur à 1 T ? Citer d'autres phénomènes d'hystérésis. Disparition de l'aimantation pour  $T > T_{\text{sat}}$ . Comment  $T_{\text{sat}}$  est-elle reliée à  $M_{\text{sat}}$  ? Les techniciens ont tout monté.
- Comment calculer le champ magnétique créé par deux aimants permanents ? Est-ce la somme des champs créés par les deux aimants ? Pouvez-vous représenter le schéma de votre dispositif expérimental (celui permettant de tracer à l'oscillo le cycle d'hystérésis d'un tore de fer doux) au tableau ? Comment obtenez-vous B et H ? Que sont les domaines de Weiss ? Comment expliquer leur répartition spatiale ? Vous avez dit que les matériaux ferromagnétiques guident les lignes de champs, comment expliquer ce phénomène ? Quelle caractéristique ( $\mu_r$ , aimantation rémanente, champ coercitif) influe de manière prépondérante sur le guidage ? Dans quel but avez-vous présenté l'expérience des domaines de Weiss ? Juste après l'ouverture des sujets, on procède à un premier choix des livres que l'on va consulter.
- Comment fonctionnent les résistances dont la résistance varie lors de la variation d'un champ ? Quel matériau utilise-t-on alors dans les transformateurs ? Comment éviter les courants de Foucault ? Démontrez rapidement que l'aire du cycle correspond à un travail perdu.

## Commentaires

- Justifier l'adéquation du type de matériau ferromagnétique à la fonction visée. Il est souhaitable de distinguer plus nettement les domaines d'application des ferro doux (tête de lecture d'un disque dur, beaucoup de cycle) et des ferro durs (aimantation rémanente, mémoire, stockage dans les disques durs).
- Présenter le tracé expérimental de B et H.
- Pour avoir un cycle à saturation, il faut que les pointes soient pointues.
- Pour les intégrateurs, utiliser le mode DC! AC est réglé pour couper le 50 Hz et donc à 1 Hz on intègre pas ce qu'on veut.
- Biblio : BFR.